

## Verfahren zur Prüfung einer Bohrung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Prüfung einer Bohrung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Das Laserimpulsbohren wird angewandt, um Bohrungen geringen Durchmessers beispielsweise an Hohlwerkstücken zu fertigen. Insbesondere Turbinenschaufeln weisen eine Vielzahl von feinen Kühlluftbohrungen auf, die sich mittels dieses Verfahrens automatisiert mit hoher Positioniergenauigkeit fertigen lassen.

Diese Bohrungen müssen jedoch hinsichtlich ihres Durchmessers genaue Toleranzen einhalten, um im Betrieb den erforderlichen Kühlluftdurchsatz zu erzielen. Deshalb muss die Maßhaltigkeit der gefertigten Bohrungen überprüft werden.

Außerdem muss sichergestellt werden, dass die Bohrung einerseits fertiggestellt wird, also nicht nur ein Sackloch gefertigt wird, und dass andererseits die Laserimpulse nach der Fertigstellung einer Bohrung nicht fortgesetzt werden und evtl. dahinter liegende Wandungsbereiche beschädigen.

Deshalb wurden bereits verschiedene Verfahren zur automatisierten Durchschuss- und Durchmessererkennung vorgeschlagen, welche anhand von Veränderungen spezifischer Merkmale des Prozessleuchtens während des Laserimpulsbohrens in unterschiedlicher Weise auf den Durchschusszeitpunkt und den Bohrungsdurchmesser schließen, vgl. DE 38 35 980 A1 und DE 38 35 980 A1. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass auch bei Anwendung derartiger Prüfverfahren noch Bohrungsfehler auftreten, die bei hohen Qualitätsanforderungen wie sie insbesondere in der Luft- und Raumfahrt auftreten, nicht toleriert werden können.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht daher darin, ein Prüfverfahren anzugeben, welches Bohrungsfehler sicherer erkennt.

**BEST AVAILABLE COPY**

Diese Aufgabe wird von einem Verfahren mit den Merkmalen des Oberbegriffs von Patentanspruch 1 durch dessen kennzeichnende Merkmale gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Gemäß der Erfindung werden zur Prüfung einer Bohrung, die mittels Laserimpulsen in ein Werkstück eingebracht wird, charakteristische Signale aus dem Bereich der Bohrung mittels eines Sensors empfangen und mit Sollwerten verglichen werden, wobei nur Signale berücksichtigt werden, die in einem charakteristischen Zeitintervall nach einem Laserimpuls empfangen werden.

Im Gegensatz zu Verfahren nach dem Stand der Technik, die das Prozessleuchten während der Dauer eines Laserimpulses untersuchen, erfolgt die erfindungsgemäße Überprüfung ausschließlich anhand von Signalen, die nach einem Laserimpuls empfangen werden. Dadurch werden Bohrungsfehler wesentlich sicherer erkannt, da während und auch noch kurz nach Erlöschen des Prozessleuchtens noch Teile des Werkstückmaterials in schmelzflüssiger Phase vorliegen. Verschiedene physikalische Phänomene, insbesondere die Minimierung der Grenzflächenenergie, können dazu führen, dass die schmelzflüssige Phase in die Bohrung gelangt, dort erstarrt und einen teilweisen oder vollständigen Verschluss der Bohrung zur Folge hat. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit einer Videokamera belegen das Auftreten solcher Bohrungsfehler.

Derartige Bohrungsfehler können mit Verfahren, welche das Prozessleuchten untersuchen, nicht festgestellt werden, wohl aber mit dem erfindungsgemäßen Verfahren, da es erst nach dem Ablauf dieser physikalischen Phänomene mit der Überprüfung beginnt.

Der Vergleich der empfangenen Signale mit den Sollwerten kann nach bekannten Verfahren, z.B. gemäß DE 38 35 980 A1 oder DE 38 35 980 A1, erfolgen.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung wird daher das charakteristische Zeitintervall in Abhängigkeit von Materialeigenschaften des Werkstücks und von Prozessparametern des Laserimpulses definiert. Dabei sind für Beginn und Ende des Zeitintervalls jeweils verschiedene Zeitpunkte möglich: Der absolut früheste sinnvolle Zeitpunkt für den Beginn ist der,

zu dem zumindest eine dünne Haut der Bohrungswandung wieder erstarrt ist, vorzuziehen ist die Erstarrung des gesamten aufgeschmolzenen Materials, denkbar ist auch danach noch für einen kurzen Zeitraum zu warten. Der früheste Zeitpunkt für das Ende des Zeitintervalls ist durch die minimale Länge des Zeitintervalls gegeben, welches benötigt wird, um eine ausreichende Menge an Signaldaten zu empfangen. Der späteste Zeitpunkt für das Ende ist der Beginn eines nachfolgenden Laserimpulses.

Die jeweiligen Zeitpunkte können empirisch oder mittels Simulationen nach bekannten Verfahren ermittelt werden.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung werden Signale optischer und/oder thermischer Art empfangen, die aus dem Bereich der Bohrung emittiert oder reflektiert werden. Der Vorteil dieser Ausgestaltung, besteht darin, dass aus derartigen Daten besonders einfach nach bekannten Verfahren auf Bohrungsfehler geschlossen werden kann. Denkbar sind allerdings auch akustische Signale, da sich die akustischen Eigenschaften einer ideal kreisrunden Bohrung von der einer fehlerhaften Bohrung signifikant unterscheiden.

Besonders vorteilhaft ist die Verwendung einer CCD-Kamera für den Empfang der Signale. Derartige Kameras sind für den optischen und thermischen (IR) Bereich verfügbar und liefern bei minimalem Handhabungsaufwand eine gegenüber optischen oder thermischen Punktensensoren vielfach größere Datenmenge. Aber auch andere elektronische Kameras sind geeignet, z.B. eine CMOS-Kamera.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird ab Beginn des Zeitintervalls ein Messsignal optischer und/oder thermischer Art in Richtung auf den Bereich der Bohrung emittiert. Dadurch ist man nicht mehr auf den Empfang von Signalen beschränkt, die noch von dem Energieeintrag durch den vorhergehenden Laserimpuls resultieren, d.h. optische und/oder thermische Strahlung der bereits erstarrten aber erst noch glühenden, dann noch heißen bis warmen Bohrungswand.

Das Messsignal kann von dem Bohrungslaser oder einem anderen Emitter emittiert werden. Entscheidend ist, dass der Energieeintrag in die Bohrung so gering bleibt, dass das Wandungs-  
material der Bohrung nicht erneut aufschmilzt.

Als besonders vorteilhaft erweist sich das erfindungsgemäße Verfahren bei der Prüfung hinsichtlich des Durchschusses durch die Werkstückwandung und/oder Abweichungen von einer vorgegebenen Bohrungsgeometrie, insbesondere bei Turbinenschaufeln, da dort besonders hohe Qualitätsanforderungen bestehen, die von Verfahren nach dem Stand der Technik nicht befriedigend erfüllt werden können.

Nachfolgend wird das erfindungsgemäße Verfahren anhand von zwei Ausführungsbeispielen näher erläutert:

In einem ersten Ausführungsbeispiel wird zunächst ein für ein gegebenes Werkstück und gegebene Laserparameter geeignetes charakteristisches Zeitintervall empirisch bestimmt. Dazu wird zunächst etwas Werkstückmaterial geschmolzen und danach während des Übergangs von der schmelzflüssigen zur festen Phase mittels einer IR-CCD-Kamera beobachtet, um charakteristische IR-Signale für den Phasenübergang zu ermitteln. Danach erfolgt eine kontinuierliche Beobachtung einer Laserbohrung mittels dieser IR-CCD-Kamera. Zu einem Zeitpunkt, zu dem sich bereits ein relatives Gleichgewicht zwischen Energiezufuhr durch die Laserimpulse und Energieabfuhr über Wärmetransport durch Bohrungswand und Luft eingestellt hat, wird der zeitliche Verlauf der Bohrungsabkühlung direkt nach dem Ende eines Laserimpulses beginnend beobachtet. Diese Beobachtung wird mehrmals wiederholt und jeweils wird der Zeitpunkt bestimmt, zu dem das charakteristische Signal des Phasenübergangs an signifikanten Stellen der Bohrung erreicht wird. Diese Zeiten werden gemittelt. Der Mittelwert liefert ein bewährtes Maß für den Anfang des charakteristischen Zeitintervalls für den gesamten Zeitraum der Laserbohrung, da davon ausgegangen wird, dass die Abkühlung zu Beginn der Bohrung, also vor Erreichen des relativen Gleichgewichts, aufgrund der noch kalten Bohrungsumgebung schneller erfolgt. Als Ende des charakteristischen Zeitintervalls wird der Beginn des neuen Laserimpulses gewählt. Somit erhält man empirisch ein definiertes Zeitintervall beginnend zu einem Zeit-

punkt a nach dem Ende eines vorgehenden Laserimpulses und endend zu einem Zeitpunkt b zu Beginn eines nachfolgenden Laserimpulses.

Nachdem so ein geeignetes charakteristisches Zeitintervall definiert ist, kann die eigentliche Fertigungsüberwachung einer Turbinenschaufel erfolgen. Dazu werden während des Fertigungsprozesses jeder Bohrung die IR-Signale der IR-CCD-Kamera, die während dem charakteristischen Zeitintervall jeweils nach einem Laserimpuls empfangen werden, mit *vorher festgelegten Sollwerten verglichen werden. Der Vergleich erfolgt nach bekannten Verfahren aus dem Stand der Technik, beispielsweise gemäß DE 38 35 980 A1 oder DE 38 35 980 A1.*

In diesem ersten Ausführungsbeispiel wird mittels der aus dem Bereich der Bohrung emittierten und von der IR-CCD-Kamera empfangenen IR-Strahlung ein komplettes IR-Abbild der Bohrung kontinuierlich aufgenommen und zur Bestimmung des Durchschusses durch die Werkstückwandung und von Abweichungen von einer vorgegebenen Bohrungsgeometrie verwendet.

Gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel wird zu Beginn des charakteristischen Zeitintervalls ein optisches Messsignal in Richtung auf den Bereich der Bohrung emittiert, dort absorbiert und in Form von IR-Strahlung wieder emittiert. Dieses zusätzliche Messsignal erhöht die Messgenauigkeit. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass die zusätzlich eingebrachte Energie nicht ein erneutes Aufschmelzen der Bohrungswandung bewirkt und so die Bohrung beschädigt. Das optische Messsignal kann auf einfache Weise mittels des Bohrlasers (durch Verkürzung der Pulsdauer und oder Intensität) erzeugt werden, aber auch durch andere Emitter, beispielsweise ein Stroboskop oder eine mittels Chopper regelmäßig unterbrochene kontinuierliche Beleuchtung. Wesentlich ist dabei die Synchronisation von Laserbohrimpulsen und Meßsignalen, deren gleichmäßiger Abstand gewährleistet werden muss, um Bohrungsfehler infolge ungleichmäßiger Erwärmung auszuschließen.

Das erfindungsgemäße Verfahren erweisen sich in den Ausführungsformen der vorstehend beschriebenen Beispiele als besonders geeignet für die schnelle und einfache Prüfung der Laserbohrungen in Turbinenschaufeln, da dort besonders hohe Qualitätsanforderungen

bestehen, die von Verfahren nach dem nach dem Stand der Technik nicht befriedigend erfüllt werden können.

Die Erfindung ist nicht nur auf die zuvor geschilderten Ausführungsbeispiele beschränkt, sondern vielmehr auf weitere übertragbar.

So kann mittels dem Verfahren nicht nur der Durchtritt und/ oder die Bohrungsgeometrie überwacht werden, sondern beispielsweise auch die aktuelle Bohrlochtiefe.

Des weiteren sind für eine Reihe von Anwendungen, für welche die Qualitätsanforderungen etwas geringer sind, auch Messungen mittels optischer/thermischer/ akustischer Punktsensoren anstatt einer CCD-Kamera oder CMOS-Kamera ausreichend.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Prüfung einer Bohrung, die mittels Laserimpulsen in ein Werkstück eingebracht wird, wobei charakteristische Signale aus dem Bereich der Bohrung mittels eines Sensors empfangen und mit Sollwerten verglichen werden, dadurch gekennzeichnet, dass nur Signale berücksichtigt werden, die in einem charakteristischen Zeitintervall nach einem Laserimpuls empfangen werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das charakteristische Zeitintervall in Abhängigkeit von Materialeigenschaften des Werkstücks und von Prozeßparametern des Laserimpulses definiert wird, vorzugsweise derart, dass das Zeitintervall beginnt, sobald das durch einen vorangegangenen Laserimpuls aufgeschmolzene Material wieder erstarrt ist, dass das Zeitintervall endet, sobald ein neuer Laserimpuls folgt.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Signale optischer und/oder thermischer Art, die aus dem Bereich der Bohrung emittiert oder reflektiert werden, empfangen werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Signale mittels einer CCD-Kamera oder einer CMOS-Kamera empfangen werden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ab Beginn des Zeitintervalls ein Meßsignal optischer und/oder thermischer Art in Richtung auf den Bereich der Bohrung emittiert wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Prüfung hinsichtlich des Durchschusses durch die Werkstückwandung und/oder Abweichungen von einer vorgegebenen Bohrungsgeometrie erfolgt.

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/DE2004/002368

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
IPC 7 B23K26/38 B23K26/03

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 B23K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 0 937 532 A (M J TECHNOLOGIES LIMITED) 25 August 1999 (1999-08-25) paragraph '0012!	1-6
X	WO 86/02301 A (ADVANCED LASER SYSTEMS, INC) 24 April 1986 (1986-04-24) page 9, lines 23-27	1-6
A	EP 0 364 914 A (MTU MOTOREN- UND TURBINEN-UNION MUNCHEN GMBH; MTU MOTOREN- UND TURBINE) 25 April 1990 (1990-04-25) cited in the application	

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- \*Z\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 February 2005

Date of mailing of the international search report

21/02/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Caubet, J-S

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/DE2004/002368

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 0937532	A	25-08-1999	US 6201214 B1	13-03-2001
			EP 0937532 A1	25-08-1999
			DE 69809188 D1	12-12-2002
			DE 69809188 T2	24-07-2003
WO 8602301	A	24-04-1986	AU 5195686 A	02-05-1986
			EP 0198076 A1	22-10-1986
			WO 8602301 A1	24-04-1986
EP 0364914	A	25-04-1990	DE 3835980 A1	26-04-1990
			DE 58900700 D1	20-02-1992
			EP 0364914 A2	25-04-1990

# INTERNATIONALE RESEARCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2004/002368

**A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES**  
IPK 7 B23K26/38 B23K26/03

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 7 B23K

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	EP 0 937 532 A (M J TECHNOLOGIES LIMITED) 25. August 1999 (1999-08-25) Absatz '0012!	1-6
X	WO 86/02301 A (ADVANCED LASER SYSTEMS, INC) 24. April 1986 (1986-04-24) Seite 9, Zeilen 23-27	1-6
A	EP 0 364 914 A (MTU MOTOREN- UND TURBINEN-UNION MÜNCHEN GMBH; MTU MOTOREN- UND TURBINE) 25. April 1990 (1990-04-25) in der Anmeldung erwähnt	

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

\*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

\*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

\*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

\*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

\*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*Z\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

14. Februar 2005

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

21/02/2005

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Caubet, J-S

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2004/002368

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
EP 0937532	A	25-08-1999	US	6201214 B1	13-03-2001
			EP	0937532 A1	25-08-1999
			DE	69809188 D1	12-12-2002
			DE	69809188 T2	24-07-2003
WO 8602301	A	24-04-1986	AU	5195686 A	02-05-1986
			EP	0198076 A1	22-10-1986
			WO	8602301 A1	24-04-1986
EP 0364914	A	25-04-1990	DE	3835980 A1	26-04-1990
			DE	58900700 D1	20-02-1992
			EP	0364914 A2	25-04-1990